

植物性食品原料水分含量检测研究进展

Advances in the detection of water content of plant-based food materials

王乐军¹ 邢优诚¹ 牛燕丽¹ 陈 凯² 姜发堂²

WANG Lejun¹ XING Youcheng¹ NIU Yanli¹ CHEN Kai² JIANG Fatang²

(1. 湖北中烟工业有限责任公司, 湖北 武汉 430000; 2. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北 武汉 430068)

(1. China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;

2. School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

摘要:综述了植物性食品原料水分含量检测方法的研究概况,分析了水分含量检测装置、优缺点及应用,总结了水分含量检测在不同类型植物性食品原料中的应用,突出了热风干燥法、微波法、卡尔费休法、绝干氮气吹扫法、光谱技术以及成像技术的优势,并展望了植物性食品原料水分含量检测未来发展的方向。

关键词: 植物; 食品; 原料; 水分含量

Abstract: This reviewed summarized the research status of water content detection methods of plant-based food materials, analyzed the water content detection devices, advantages, disadvantages and applications, and discussed the application of water content detection in different types of plant-based food materials. The advantages of hot air drying, microwave method, Karl Fischer method, absolute dry nitrogen purge method, spectral technology and imaging technology were highlighted, and the future development direction of water content detection of plant-based food materials was prospected.

Keywords: plant; food; material; water content

水分是植物的主要成分,在植物细胞器、细胞、组织、器官中的含量、分布和状态差别极大,如线粒体中水分含量为 50% 左右,液泡含水量可达 90% 以上,嫩叶含水量为 80%~90%,面粉含水量为 12.0%~14.5%。植物中的水直接影响物质运输、蒸腾作用、呼吸作用及其他代谢^[1-2]。植物自由水具有普通水的性质,易受环境和加工的影响;结合水会与细胞中糖类、蛋白质等结合成牢固的胶体水分,不易受外在条件影响^[3]。经加工处理,植物

性食品原料(PFM)中水的状态发生改变,原料外观、质地及新鲜度等也会发生变化。

水分含量检测主要有直接检测法和间接检测法。直接检测法是基于原料中水分自身游离易丢失和化学反应等原理来测定,如热风干燥法、微波加热法、蒸馏法、绝干氮气吹扫法和卡尔费休法等;间接检测法是利用水中光折射、吸收、电导率、电磁波衰减、氢原子核自旋等物理信号的变化来测定,如阿贝折射法、阻容法、微波检测法、光谱法、低场核磁共振法等。文章拟基于 PFM 水分含量检测的复杂性及方法的多样性,综述水分含量检测方法、装置及应用,以为不同类型的 PFM 水分含量检测方法的选择提供依据。

1 植物性食品原料水分含量检测方法

1.1 直接检测法

直接检测法是根据干燥前后重量差来计算水分含量,属于有损检测。如吸湿干燥法是利用干燥器密封空间内干燥剂吸收样品扩散出的水蒸气,经较长时间的持续吸湿作用至恒重。干燥剂如硅胶、碱石灰、无水 CaCl_2 、无水 MgSO_4 、饱和盐溶液等;热风干燥法是由烘箱内部提供持续热流,促进样品水分蒸发,达到快速干燥的目的,等同于 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的直接干燥法。吴茜茜等^[4]采用热风干燥法通过调节小麦水分含量研究其对尖孢镰刀菌产孢和产毒素的影响;减压干燥法是以降低压强的方式来降低水的沸点,加热促进水分蒸发,不适用于水分含量小于 0.5% 的样品。李淑君等^[5]发现真空度为 0.07 MPa、干燥时间为 6 h、干燥温度为 65 °C 下干制的胡萝卜中硒含量较高;蒸馏法是利用高水分含量或挥发性强的样品与高沸点有机溶剂混合进行蒸馏,按回收水分体积计算样品的水分含量(见图 1),适用于果蔬、调味品等,样品中水分含量应高于 1%。Bertouche 等^[6]采用蒸馏法测得洋葱中水分含量为 87.8%。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31972156);湖北省教育厅科研计划项目(编号:Q20211408)

作者简介:王乐军,男,湖北中烟工业有限责任公司工程师。

通信作者:牛燕丽(1980—),女,湖北中烟工业有限责任公司高级工程师,硕士。E-mail: kady2016@163.com

收稿日期:2022-10-25 **改回日期:**2023-05-11

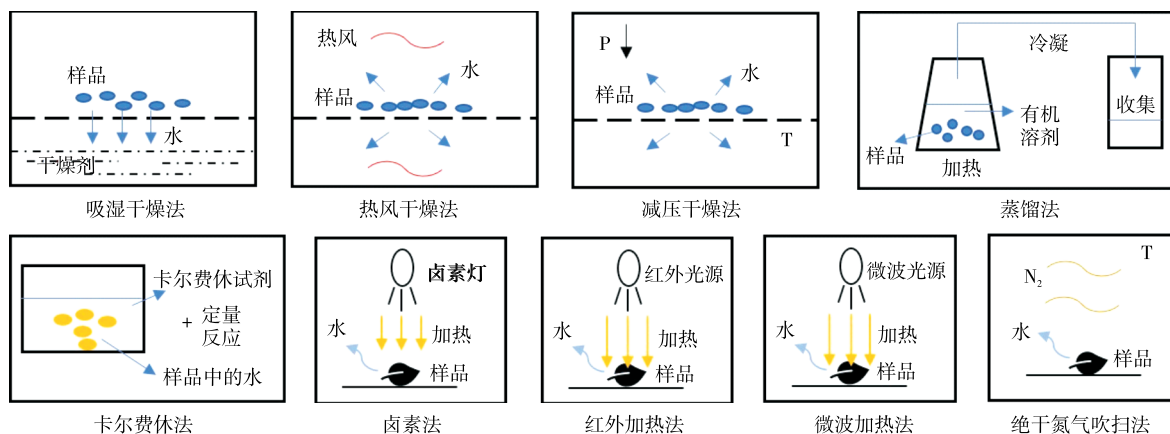


图1 水分含量直接检测法原理

Figure 1 Direct detection of moisture content

卡尔费休法适用于低水分含量的样品,是利用 I_2 、 SO_2 、吡啶及甲醇制成卡尔费休试剂,使样品中水分与试剂发生氧化还原反应,至水分消耗完毕,根据卡尔费休试剂的消耗量可计算出样品水分含量(图1)。卡尔费休法被英国标准等诸多组织公认为测定水分含量的经典方法,其准确性最高,检测结果最接近真实值。孔伟等^[7]采用该法测得芝麻油、橄榄油、花生油中水分含量分别为0.069%,0.081%,0.04%。周奕等^[8]测定了3种植物性烟油的水分含量分别为5.526%,8.959%,15.937%,表明该方法检测范围广。

卤素法比热风干燥法更为快捷,是以卤素灯加热样品,使水分快速蒸发(图1)。蔡瑜等^[9]采用卤素法检测出生菜叶、黄瓜果肉、茄子果肉、青椒的水分含量分别为92.90%,95.98%,92.14%,91.30%,与热风干燥结果无显著差异;Verma等^[10]利用卤素法测得燕麦粉中水分含量为8.73%。该方法具有检测范围广,样品用量少,用时短,样品类型多样等特点。

红外加热法是利用红外光照射物体,部分穿透和反射,物体吸收的红外光转化为内部分子动能,水分快速蒸发。短中波红外检测枣切片水分含量为2.98%,与热风干燥相比,其干燥时间短、效率高、产物质量佳^[11]。刘二喜等^[12]采用该法于140℃下快速干燥魔芋粉,测得其水分含量约为8.4%。采用中短波红外和中远红外干燥红枣泥片,干燥时间分别为450~750,106~126 min,品质差异不大,且中远红外的维生素C保留率显著高于中短波红外的^[13]。与红外加热类似,微波加热依靠材料吸收微波能量转化为热能,使材料升温,水分快速蒸发(图1),具有检测重量范围广,水分含量范围大等优点。沈伟等^[14]运用微波、烘箱、远红外干燥芒果果皮,其中微波干燥效率最高,但易造成色素分解。采用微波加热法测定苦杏仁的水分含量,可替代标准烘箱法,缩短了检测时

间,操作简便、准确^[15]。

绝干氮气吹扫法是基于样品表面与周围水蒸气分压差及样品内外水势差的原理检测水分含量,在氮气作用下进行干燥(图1)。李君^[16]运用此法分析葡萄干的水分含量及水分转移规律,研究了10%~90% RH范围内水分含量的变化。与饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附相比,绝干氮气吹扫法的重复性和准确性更高。与热风干燥和真空干燥相比,绝干氮气法未对样品形貌产生明显影响,可用于结构特殊和含有挥发物的样品中水分检测^[17]。

1.2 间接检测法

阿贝折射法是利用光经过透明或半透明液体发生折射,通过折射率和平均色散来计算水分含量(图2),可用于糖溶液的水分含量检测,其折射率随糖浓度的变化而变化,水分含量的计算与温度和折射率相关。Ramos等^[18]运用此法测定桉树、苜蓿中水分含量分别为16.15%,16.32%。

阻容法是根据水分与电阻值或电容值之间存在的定量关系,将电阻值或电容值转换成可测量(图2)。其测定范围为10%~30%,阻容法水分仪被称为“粮食水分测定仪”。Singh等^[19]采用电容式水分传感器单元进行谷物水分测量,获取不同的电容信号,揭示了低频有利于类似样品的测定。

近红外光谱法是利用水对某些特定波长的近红外光强烈吸收来检测水分含量,通过朗伯比尔定律计算(图2),主要用于固体颗粒、粉末、叶片样品的无损检测,其分析速度快。但氢的存在增加了水分含量测定的不确定性;只能测定表层水分,不适合检测内部水分^[20];近红外需不断校准建模,程序复杂、费时^[16]。Pan等^[21]采用可见光和近红外光谱法,利用偏最小二乘回归分析计算出甜菜水分含量为72.19%。杨植等^[22]基于近红外光谱

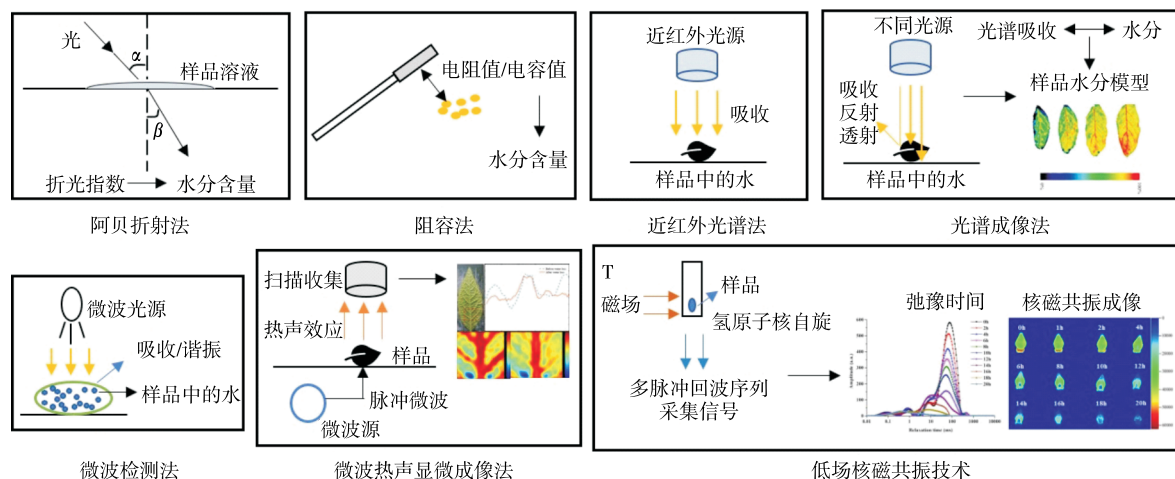


图 2 水分含量间接检测法

Figure 2 Indirect detection of moisture content

法对红枣水分进行检测,建立光谱模型,明确了红枣近红外光谱和水分含量之间的对应关系。

以叶为例,光谱成像是利用光照射到叶片上部分吸收、反射或透射,形成的光谱数据经处理,消除叶片自然纹理影响,从而建立水分含量与光谱吸收之间的关系(图 2)^[23]。构建叶片水分模型,可预测叶片水分含量。光谱成像可全株检测,获取样品的光谱图和水分分布信息。目前,可见光、近、中、短波,热红外和高光谱的成像均有报道,由于具备光谱和空间分辨能力,检测对象广泛,被广泛应用于植物遥感和农业灌溉中^[24]。李红等^[25]采用高光谱成像对生菜冠层进行检测,建立了多个水分含量检测模型,通过计算生菜冠层每个像素点的干基含水率生成了可视化分布图。

区别于微波加热,微波检测法是利用微波衰减和谐振的影响,其微波方向性好,贯穿能力强,能穿透非金属材料,适合于存在内部缺陷的材料。微波照射含水材料时,部分电磁波被水分子吸收而衰减,同时电场谐振频率受水分子氢离子和氢氧根离子影响(图 2)^[26]。顾颢等^[27]运用该法测定大米水分含量,具有较高的预测精度,实现了水分的快速、无损检测。

微波热声成像结合了微波高对比和超声的高分辨率,被广泛用于植物领域。汤永辉^[24]提出了一种微波热声显微(TAM)成像技术,可用于叶片水分分布检测,提高了微波热声成像的分辨率。采用 TAM 检测曼陀罗叶片失水前后的图像,其重复性良好(图 2),水分可视化,适用于农业检测。

低场核磁共振技术(LF-NMR)主要为测试分子与分子之间的动力学信息,利用氢原子核在磁场中的自旋弛豫特性^[28],通过不同束缚状态的水弛豫时间的不同测定水分含量(图 2),通过弛豫时间得到分子运动信息,属亚微观领域(分子间),被广泛应用于食品、石油、医药、纺

织、聚合物等。汤永辉^[24]为了验证微波热声显微成像的可靠性,比对了 LF-NMR 检测曼陀罗、野苘蒿、紫苏叶片水分的结果,展现了两种技术的准确性。Hickey 等^[29]用该法检测马铃薯片在 70%,80%,95% RH 下,水分含量分别为 8.0%,11.8%,31.5%。李添宝等^[30]利用 LF-NMR 检测了芝麻油、玉米油和葵花籽油中水分含量分别为 0.09%,0.13%,0.09%,表明 LF-NMR 可检测极低水分含量的植物样品,检测范围广,且可检测非均相固态或均相流体。

2 水分含量检测装置

2.1 直接检测装置

干燥箱常压下 95~105 ℃干燥样品,干燥效率高,缺陷在于高温干燥可能引起样品非水性挥发物的逃逸,造成结果偏离真实值(表 1)^[31]。而真空干燥箱专为热敏感、易分解和易氧化样品的干燥而设计,主要由真空泵、数显控温系统和真空表、干燥室组成,温度范围为 200 ℃以下,真空度为 0.10~99.99 kPa,检测时间受温度和真空度影响。

卡尔费休水分测定仪主要由阴极室、阳极室、电解电极、测量电极、干燥管和数显装置等组成,水分含量检测范围为 0.001%~100%,可检测固体、液体及气体样品,但易受系统偏差影响。而且卡尔费休试剂中含有有毒有害化合物(如有机碱、二氧化硫、甲醇、氯仿),消耗量大,对人体和环境有害^[32-33]。

卤素水分测定仪主要由内置天平、卤素灯、控温装置、自动计算程序等组成。该装置测定用量少,10 min 左右即可完成,适用于颗粒状、粉末状、片状物和无挥发性液体样品的水分含量测定^[34]。但原料水分以及结合水不能完全移出,导致结果偏离真实值。此外,由于腔体狭小,其进样量小。

微波加热仪内置分析天平,另有微波炉腔体和红外温度传感器。微波加热仪加热速度快,但受样品内在质地影响大,干燥时样品内外干燥程度不一。潘兴家等^[35]发现麦秆粉末水分流失分阶段进行,随着干燥温度的升高,水分流失加大,微波能量转换提高;当干燥温度较高时,水分流失加剧,微波能量转换降低;继续升温使麦秆粉末裂解,微波能量转换上升。

基于绝干氮气吹扫法研发的动态水分转移规律分析仪由腔体、内置天平、温湿度检测装置、氮气输入装置、加湿器等组成。王浩等^[17]研发了动态水分转移规律分析仪(表1),可用于水分含量检测及不同温湿度条件下水分转移规律研究。该装置准确度高、重复性好,样品类型广,但氮气消耗大、用时长,对于高自由水含量的样品检测更准确。

2.2 间接检测装置

阿贝折射仪主要由目镜、棱镜、调节手轮等组成。该装置操作方便,用样少,样品需制备成透明或半透明的液体,制样过程容易导致误差。阻容水分测定仪包括电容式和电阻式,常见商品化的装置如粮食水分测定仪(表1)。便携式的单探针或双探针插入式粮食水分仪,插

入谷物中即可读数;便携电阻式粮食水分仪体积更小,由数字显示器、样品盘、旋转手柄构成,进样量仅几粒谷物;漏斗式粮食水分仪由漏斗、落料筒、检测传感器、操作面板组成,进样量大。另有夹片式电容、电阻水分测定仪,由夹片、电极、操作面板组成,可用于检测片状样品^[24]。

高光谱成像技术被广泛应用于农业领域,如GaiaField高光谱成像系统主要由成像镜头、高光谱成像仪、数据采集软件、计算机构成,全波段光谱范围为400~1 000 nm,光谱分辨率可优于3 nm,可获得数百个光谱通道。其检测过程复杂,需进行光谱图像黑白标定,消除光谱图像的背景噪音,需校正样品形状不规则引起的光照不均,建立水分含量检测模型^[36]。

微波水分检测仪主要由微波源、微波接收探头、信号处理器、密度感应探头、进样室、计算机显示器等组成。其重复性好、准确度高;但对样品类型限制大,需提前建立和校正模型通道^[37-38]。TAM主要由数据采集软件、信号放大装置、扫描探头及微波源组成。微波脉冲信号和所产生的热声信号容易受环境噪音干扰;限片状或微粒、粉末状样品,厚度较大的样品会减弱热声信号;TAM对形状不规则或不均一的样品成像较弱,分辨能力不足^[24]。

表1 植物性食品原料水分含量检测装置的优缺点及应用

Table 1 The advantages, disadvantages and applications of moisture content detection devicesfor PFM

装置	测重范围/g	优点	缺点	应用	检测项目	参考文献
有损检测						
干燥器	范围广	装置简单、易操作	耗时长、称样易吸湿	辣椒油树脂	水分含量	[16]
烘箱	范围广	装置简单、易操作	非水性物质逃逸引起误差	小麦	水分含量	[4]
真空干燥箱	范围广	易操作	温度和真空度影响大	胡萝卜	水分含量	[5]
蒸馏装置	5.0~20.0	装置简单、易操作	有机溶剂消耗大、冷凝水回收不彻底	洋葱	水分含量	[9]
卡尔费休水分测定仪	$3\times 10^{-6}\sim 0.2$	操作简单、速度快、准确	有害试剂消耗大、易受干扰	植物油	水分含量	[7]
卤素水分测定仪	0.3~3.0	装置简单、速度快、实时监测	误差大	燕麦粉	水分含量	[10]
红外水分测定仪	0~60.0	速度快、升温快	干燥不彻底	魔芋粉	水分含量	[12]
微波加热水分仪	0~200.0	速度快、准确	干燥效率受样品形态影响大	芒果果皮	水分含量	[14]
水分转移规律测定仪(绝干氮气法)	适量	易操作、准确、测定样品类型广	速度相对慢、较昂贵	葡萄干	水分含量及水分吸附	[16]
无损检测						
阿贝折射仪	微量	装置简单、易操作	样品需制备成透明、半透明液态	苜蓿	水分含量	[18]
阻容法水分测定仪	范围广	适用于粮食检测	水分范围3%~35%为宜	谷物	水分含量	[19]
近红外分析仪	范围广	速度快	测定表层水、受氮影响	甜菜	水分含量	[21]
光谱成像分析仪	范围广	直观高效	校准过程复杂	曼陀罗叶	水分分布及变化	[24]
微波水分检测仪	大量	速度快、准确	受样品形态限制大	大米	水分含量	[27]
微波热声显微成像系统	范围广	操作简单、速度快、直观	限厚度小样品	曼陀罗叶	水分分布及变化	[24]
低场核磁共振波谱仪	少量	速度快、精度高、直观	建模和校准复杂	马铃薯片	水分含量	[29]

低场核磁共振波谱仪主要由磁铁、射频脉冲发射器、能量检测线圈、信号放大器、数据采集卡、计算机等组成,其精度高、重复性好、需样品量少,受样品的外在品质影响较小,可直观反映样品内水分的分布和结合状态,被广泛应用于农产品等复杂原料中的水分测定^[39-40];需经过卡尔费休法或热风干燥等方法拟合校正,且模型建立和校准较为复杂(表 1)。

3 水分含量检测在不同类型植物性食品原料中的应用

大部分水分含量检测方法适用于叶片,如热风干燥法、光谱法、微波加热法等(表 2)。步正延等^[41]采用热风干燥和太赫兹光谱成像检测大豆叶片中水分含量,其预测精度较高;近红外光谱法可用于枇杷叶水分快速测定,模型准确可靠、稳定性高^[42]。

对于植物根、茎类,可采用蒸馏法检测洋葱水分,低场核磁技术检测马铃薯片水分,减压干燥法检测胡萝卜水分^[5-6,29];通常采用自然干燥、热风干燥法、微波加热法、远红外法、减压干燥等方法干燥食药同源类中草药^[44]。毛佩芝等^[51]采用近红外光谱法对野菊花水分含量进行测定,所建模型可准确检测水分含量,且结果偏差低于烘箱法的;叶秋萍等^[52]运用低场核磁共振技术分析了解茉莉花茶窈花前、通花前、起花前、烘干后的茶样的水分分布情况。

在果实原料方面,李君^[16]运用绝干氮气吹扫法测定葡萄干水分含量,揭示其高精密度和代表性;微波加热法可用于芒果果皮的水分含量检测^[14]。种子是食品工业中的重要原料,刘振宇^[57]采用烘箱法测定了葵花籽、玉米中的水分;吕都等^[58]运用近红外光谱法对稻谷的水分含量进行了快速测定,模型准确度高,预测值与实测值误差在±0.5%以内;电容式阻容法可用于稻谷的水分含量检测^[19]。通常高光谱成像技术被用于全株植物的整体成像(表 2)^[25]。

孔伟等^[7]采用卡尔费休法检测了芝麻油、橄榄油、花生油中的水分含量;为优化大豆粉水分含量的干燥条件,可采用热风干燥研究其最优条件;红外法和卤素法分别被用于魔芋粉和燕麦粉的水分含量测定^[10,12];鞠兴荣等^[59]采用近红外光谱法对稻谷的水分含量进行了快速测定,其中偏最小二乘方法的预测效果最佳。

PFM 的水分含量检测将朝着通用、便捷、精确、可视化、智能化以及联用的方向发展。例如热风干燥法、微波加热法等对于片状、粉末、颗粒、块状等不同 PFM 具有通用性^[45-46,48,50,55,64];近红外光谱技术在片状、颗粒等形态适宜的样品检测中表现出通用性和便捷性^[42-43,53-54,58-59];卡尔费休法的精确性好,可作为标定

表 2 水分含量检测在植物性食品原料中的应用

Table 2 Application of moisture content detection in PFM

原料	来源植物	检测方法	参考文献
叶	大豆	烘箱法、光谱成像(太赫兹)	[41]
	枇杷	近红外光谱法、烘箱法	[42]
	曼陀罗	微波热声显微成像	[24]
	葡萄	热成像+近红外光谱技术	[43]
茎	洋葱	蒸馏法	[6]
	马铃薯	低场核磁共振法	[29]
	中草药	烘箱法、微波加热、远红外、减压干燥	[44]
	莲藕片	烘箱法、真空微波法	[45-46]
根	胡萝卜	减压干燥法、高光谱成像	[5,47]
	人参	烘箱法	[48]
	葛根	蒸馏法	[49]
	紫薯粉	烘箱法、微波加热法	[50]
花	菊花	近红外光谱法、烘箱法	[51]
	茉莉花	低场核磁共振法	[52]
	金银花	近红外光谱法	[53]
果实	葡萄	绝干氮气吹扫法	[16]
	芒果	微波加热法	[14]
	枣	近红外光谱法	[54]
	油辣椒	烘箱法	[55]
种子	柿饼	可视化近红外光谱法	[56]
	玉米	烘箱法	[57]
	水稻	近红外光谱法	[58-59]
	谷物	阻容法、微波检测法	[19,27,60]
全株	芝麻、橄榄、花生(植物油)	卡尔费休法	[7]
	鹰嘴豆(粉末)	热风干燥法	[61]
	魔芋(粉末)	红外加热法	[12]
	燕麦(粉末)	卤素法	[10]
全株	大豆	高光谱成像	[62]
	生菜草本植物	高光谱成像	[25]
	草本植物	高光谱成像	[63]
	香菇	烘箱法+微波加热法	[64]

方法;绝干氮气吹扫法的准确度高,适用于组分复杂的样品^[16]。成像技术为水分含量的检测提供了直观效果,水分分布、结合及位点信息呈现可视化和智能化^[24-25,29,47,56,62-63]。光谱技术与成像技术联用^[41,43,56,63],或其他检测方法的协同使用^[46,64]将更有利于 PFM 水分含量的检测。

4 结语

水分含量是植物性食品原料的重要指标之一,对于不同类型的原料,应选择适宜的测定方法,可以提高测定结果的准确性。结合各检测方法在植物性食品原料中的应用可知,热风干燥法、光谱法、微波检测法、低场核磁可普遍用于各类植物原料;阻容法主要用于谷物原料;卡尔费休法的检测结果最接近真实值,检测范围广,可用于植物油等低含水量原料的检测;绝干氮气吹扫法适用于多种类型原料,包括复杂组分原料以及高自由水含量样品,其重复性好,可应用推广。水分检测的可视化、智能化是未来发展的趋势,传统检测方法可与光谱成像法有机结合。

参考文献

- [1] TURNER N C, BURCH G J, 董务民. 水在植物中的作用[J]. 力学进展, 1984(4): 481-505.
TURNER N C, BURCH G J, DONG W M. The role of water in plants[J]. *Advances in Mechanics*, 1984(4): 481-505.
- [2] 邵明安. 试论植物根系中水分运动的动力学[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1991(1): 38-51.
SHAO M A. On the dynamics of wafer movement through root system[J]. *Memoir of NISWC, Academia Sinica & Ministry of Water Conservancy*, 1991(1): 38-51.
- [3] 苗银月. 阻抗谱法研究植物叶片水分关系[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 10-15.
MIAO Y Y. Application of impedance spectroscopy in the study on leaf water[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011: 10-15.
- [4] 吴茜茜, 周金旺. 环境条件对小麦贮藏中主要危害真菌孢子及毒素生成的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(13): 183-185, 188.
WU Q Q, ZHOU J W. Effects of environmental conditions on spore and toxin formation of major harmful fungi in wheat storage[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(13): 183-185, 188.
- [5] 李淑君, 陶吉兰, 王雨洁. 真空干燥法对海东胡萝卜富硒工艺条件的优化[J]. 现代食品, 2021(15): 56-59, 66.
LI S J, TAO J L, WANG Y J. Optimization of se-enriched process conditions of Haidong carrots by vacuum drying method[J]. *Modern Food*, 2021(15): 56-59, 66.
- [6] BERTOUCHE S, TOMAO V, RUIZ K, et al. First approach on moisture determination in food products using alpha-pinene as an alternative solvent for Dean-Stark distillation[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(1): 602-605.
- [7] 孔伟, 孟庆宇, 蒋甜燕, 等. 卡尔·费休法测定食用油中的水分[J]. 现代食品, 2018(16): 102-104, 107.
KONG W, MENG Q Y, JIANG T Y, et al. Determination of edible oil moisture by Carle Fischer method[J]. *Modern Food*, 2018(16): 102-104, 107.
- [8] 周奕, 王萍娟, 王维刚, 等. 关于卡尔费休法在电子烟烟油水分检测中的应用研究[J]. 化学与粘合, 2019, 41(5): 398-401.
ZHOU Y, WANG P J, WANG W G, et al. The research of Carle Fischer method used to detect moisture in electronic cigarette smoke oil[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2019, 41(5): 398-401.
- [9] 蔡瑜, 王兆卫, 樊雪妮, 等. 卤素水分测定仪法测定 5 种蔬菜水分含量[J]. 吉林医药学院学报, 2018, 39(4): 246-249.
CAI Y, WANG Z W, FAN X N, et al. Determination of water contents in five kinds of vegetables by halogen water determination meter method[J]. *Journal of Jilin Medical University*, 2018, 39(4): 246-249.
- [10] VERMA T, WEI X, LAU S K, et al. Evaluation of *Enterococcus faecium* NRRLB-2354 as a surrogate for *Salmonella* during extrusion of low-moisture food[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(4): 1 063-1 072.
- [11] CHEN Q Q, BI J F, WU X Y, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 759-766.
- [12] 刘二喜, 冉农平, 杨朝柱, 等. 魔芋粉中水分的红外干燥法快速测定[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(1): 191-193.
LIU E X, RAN N P, YANG Z Z, et al. Rapid determination of moisture content in konjac flour dried by infrared moisture meter [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(1): 191-193.
- [13] 郑霞. 基于不同干燥技术的红枣泥片干燥特性及品质研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 15-37.
ZHENG X. The drying characteristics and quality of jujube tablets based on different drying technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 15-37.
- [14] 沈伟, 张培兰, 牛俊乐, 等. 不同干燥方式对芒果果皮理化特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 87-92.
SHEN W, ZHANG P L, NIU J L, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of mango pericarp [J]. *Storage and Process*, 2021, 21(9): 87-92.
- [15] 朱海兰, 朱周静, 李科友. 微波加热法测定苦杏仁水分含量的研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 117-120.
ZHU H L, ZHU Z J, LI K Y. Determination of moisture content in bitter almond with microwave heating method [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(6): 117-120.
- [16] 李君. 复杂组分体系(葡萄干和蜂蜜)的水分含量和水分吸湿等温线测定方法的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020: 6-10.
LI J. Study on themethod of determining moisture content and moisture absorption isotherm of complex component systems (Raisin and honey)[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020: 6-10.
- [17] 王浩, 郑晗, 肖满, 等. 爆珠水分含量测定方法比较研究[J]. 香料香精化妆品, 2020, 12(6): 1-6, 11.

- WANG H, ZHENG H, XIAO M, et al. Comparison of determination methods for moisture content in capsules [J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2020, 12(6): 1-6, 11.
- [18] RAMOS O Y, SALOMON V, LIBONATTI C, et al. Effect of botanical and physicochemical composition of Argentinean honeys on the inhibitory action against food pathogens [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 457-463.
- [19] SINGH H, BANSOD B S, THAKUR R, et al. Calibration of capacitive cell for measuring moisture content in grains [J]. *International Journal of Pure and Applied Physics*, 2017, 13(1): 146-149.
- [20] YE D D, SUN L J, ZOU B R, et al. Non-destructive prediction of protein content in wheat using NIRS [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 189: 463-472.
- [21] PAN L Q, LU R F, ZHU Q B, et al. Measurement of moisture, soluble solids, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 102: 42-50.
- [22] 杨植, 王振磊, 林敏娟. 基于近红外光谱技术的红枣水分无损检测 [J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(12): 2 320-2 326.
- YANG Z, WANG Z L, LIN M J. Nondestructive testing of jujube moisture based on near infrared spectroscopy [J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2021, 58(12): 2 320-2 326.
- [23] 孙红, 刘宁, 吴莉, 等. 高光谱成像的马铃薯叶片含水率分布可视化 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 910-916.
- SUN N, LIU N, WU L, et al. Visualization of moisture content distribution in potato leaves by hyperspectral imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 910-916.
- [24] 汤永辉. 用于植物叶片水分检测的微波热声显微成像技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 11-38.
- TANG Y H. Thermoacoustic microscopy for plant leaf water distribution imaging [J]. *Chengdu: University of Electronic Science and Technology*, 2021: 11-38.
- [25] 李红, 张凯, 陈超, 等. 基于高光谱成像技术的生菜冠层含水率检测 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 211-217, 274.
- LI H, ZHANG K, CHEN C, et al. Detection of moisture content in lettuce canopy based on hyperspectral imaging technique [J]. *Transactions of the Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 211-217, 274.
- [26] ZHANG J Y, DU D D, BAO Y, et al. Development of multi-frequency swept microwave sensing system for moisture measurement of sweet corn with deep-neural-network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 6 446-6 454.
- [27] 顾颢, 张世庆, 蔡健荣, 等. 基于微波的大米水分快速检测研究 [J]. *食品科技*, 2015(6): 318-321.
- GU H, ZHANG S Q, CAI J R, et al. Rapid measurement for rice moisture based on microwave [J]. *Food Science and Technology*, 2015(6): 318-321.
- [28] CUI L, CHEN Y, LI M, et al. Detection of water variation in rosebuds during hot-air drying by LF-NMR and MRI [J]. *Drying Technology*, 2019, 38(3): 304-312.
- [29] HICKEY H, MACMILLAN B, NEWLING B, et al. Magnetic resonance relaxation measurements to determine oil and water content in fried foods [J]. *Food Research International*, 2006, 39(5): 612-618.
- [30] 李添宝, 吴越, 罗敬. 利用核磁共振法定量分析植物油中多种脂肪酸及水含量 [J]. *食品科学*, 2014, 35(16): 212-216.
- LI T B, WU Y, LUO J. Quantitative analysis of fatty acids and water in vegetable oils by nuclear magnetic resonance [J]. *Food Science*, 2014, 35(16): 212-216.
- [31] NIRMAAN A M C, PRASANTHA B D R, PEIRIS B L. Comparison of microwave drying and oven-drying techniques for moisture determination of three paddy (*Oryza sativa* L.) varieties [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2020, 7(4): 742-746.
- [32] 李玉忠. 物性分析仪器 [M]. 北京: 化学出版社, 2005: 9-20.
- LI Y Z. Physical property analysis instrument [M]. Beijing: Verlag Chemie, 2005: 9-20.
- [33] 马跃龙, 薛峰, 印杰, 等. 溶剂萃取—卡尔·费休法测定婴儿配方乳粉中的真实水分 [J]. *食品工业*, 2018, 39(5): 159-161.
- MA Y L, XUE F, YIN J, et al. Extraction-Karl Fisher method to determine the real water content of infant formula milk powder [J]. *The Food industry*, 2018, 39(5): 159-161.
- [34] 祝婕. 稻谷水分测定方法对比与分析 [J]. *现代食品*, 2020(18): 159-161.
- ZHU J. Comparison and analysis of methods for determination of rice moisture [J]. *Modern Food*, 2020(18): 159-161.
- [35] 潘兴家, 王居飞, 李旭辉, 等. 端口开启方式对麦秆微波加热的影响 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(2): 227-234.
- PAN X J, WANG J F, LI X H, et al. Effect of port opening method on the microwave heating of wheat straw [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2022, 48(2): 227-234.
- [36] AMJAD W, CRICHTON S O J, MUNIR A, et al. Hyperspectral imaging for the determination of potato slice moisture content and chromaticity during the convective hot air drying process [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 166: 170-183.
- [37] LI C X, YU X T, CHEN Z Z, et al. Free space traveling-standing wave attenuation method for microwave sensing of grain moisture content. *Measurement and Control*, 2021, 54(3/4): 336-345.
- [38] 刘培, 林建华, 王宏伟. 基于微波的粮食水分检测密度无关算法 [J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(6): 113-116.
- LIU P, LIN J H, WANG H W. Density independent algorithm for

- grain moisture detection based on microwave[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(6): 113-116.
- [39] WANG Z H, YU X L, ZHANG Y Q, et al. Effects of gluten and moisture content on water mobility during the drying process for Chinese dried noodles [J]. Drying Technology, 2019, 37 (6): 759-769.
- [40] HICKEY H, MACMILLAN B, NEWLING B, et al. Magnetic resonance relaxation measurements to determine oil and water content in fried foods[J]. Food Research International, 2005, 39 (5): 612-618.
- [41] 步正延, 李臻峰, 宋飞虎, 等. 基于太赫兹成像技术的大豆叶片水分含量测定[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1 420-1 426.
- BU Z Y, LI Z F, SONG F H, et al. Determination of moisture content in soybean leaves based on terahertz imaging [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(8): 1 420-1 426.
- [42] 李蕾蕾, 王海霞, 林萍, 等. 近红外光谱技术在枇杷叶水分含量测定中的应用[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(19): 104-107.
- LI L L, WANG H X, LIN P, et al. Application of near-infrared spectroscopy in determination of moisture content in *Eriobotrya japonica*[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(19): 104-107.
- [43] 李光君. 热成像技术与近红外光谱技术结合无损检测西拉葡萄叶片水分含量[J]. 山西农业科学, 2016, 44(10): 1 467-1 475.
- LI G J. Combination of thermal imaging and NIR spectroscopy technology to test water content in Shiraz leaves [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 1 467-1 475.
- [44] 徐晚秀, 李静, 宋飞虎, 等. 中草药干燥现状[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(24): 8 159-8 161.
- XU W X, LI J, SONG F H, et al. Current status of Chinese herbal medicine drying[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(24): 8 159-8 161.
- [45] 杨松, 伍玉茜, 陈敏, 等. 不同品种莲藕加工脆片适宜性评价[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 199-203, 209.
- YANG S, WU Y H, CHEN M, et al. Suitability evaluation for processing chips from different Lotus root cultivars[J]. Food & Machinery, 2019, 35(7): 199-203, 209.
- [46] 刘春泉, 张钟元, 李丽娟, 等. 莲藕片真空微波联合气流膨化干燥工艺[J]. 核农学报, 2015, 29(4): 751-760.
- LIU C Q, ZHANG Z Y, LI L J, et al. Optimization of combined vacuum microwave-explosion puffing drying of *Nelumbo nucifera* Gaertn chips[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29 (4): 751-760.
- [47] 陆佳, 刘强, 赵楠, 等. 基于高光谱成像的干燥胡萝卜片水分及类胡萝卜素含量无损检测和可视化分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 285-291.
- YANG J, LIU Q, ZHAO N, et al. Hyperspectral imaging for non-destructive determination and visualization of moisture and carotenoid contents in carrot slices during drying[J]. Food Science, 2020, 41(12): 285-291.
- [48] 张达正, 刘强, 曹志强. 测定人参水分、总灰分、酸不溶性灰分含量的不确定度评估[J]. 人参研究, 2007(2): 15-17.
- ZHANG D Z, LIU Q, CAO Z Q. Evaluation of uncertainty in determination of water, total ash and acid insoluble ash contents of ginseng[J]. Ginseng Research, 2007(2): 15-17.
- [49] 秦丹, 谭兴和, 林亲录. 埋藏处理对葛根贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2004(2): 186-189.
- QIN D, TAN X H, LIN Q L. Effect of soil burying storage of Kudzu[J]. Food Science, 2004(2): 186-189.
- [50] 熊添, 蔡芳, 何建军, 等. 不同干燥工艺下紫薯全粉品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 49-57.
- XIONG T, CAI F, HE J J, et al. Quality analysis of purple sweet potato flour under different drying processes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 49-57.
- [51] 毛佩芝, 杨凯, 金叶, 等. 近红外光谱法快速测定野菊花药材中水分及蒙花苷含量[J]. 中国现代应用药学, 2015, 32(12): 1 428-1 432.
- MAO P Z, YANG K, JIN Y, et al. Rapid determination of moisture and linarin in Flos *Chrysanthemi indic* by NIR technique [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2015, 32(12): 1 428-1 432.
- [52] 叶秋萍, 余雯, 郑世仲, 等. 茉莉花茶窈制过程水分变化与香气品质变化的相关性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 266-272.
- YE Q P, YU W, ZHENG S Z, et al. Correlation analysis of moisture content and aroma quality in the scenting process of jasmine tea[J]. Food Science, 2022, 43(24): 266-272.
- [53] 白雁, 李珊, 张威, 等. 近红外光谱法快速检测金银花中水分的含量[J]. 中国现代应用药学, 2011, 28(11): 1 024-1 027.
- BAI Y, LI S, ZHANG W, et al. Rapid determination of moisture in honeysuckle by near-infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2011, 28(11): 1 024-1 027.
- [54] 王文霞. 基于近红外光谱技术的干制哈密大枣水分含量无损检测与模型优化研究[D]. 新疆: 石河子大学, 2020: 17-26.
- WANG W X. Nondestructive testing and model optimization of moisture content of dried hami dates based on near infrared spectroscopy[D]. Xinjiang: Shihezi University, 2020: 17-26.
- [55] 杨波, 卢垣宇. 干燥失重法检测油辣椒中水分含量的不确定度评定[J]. 食品安全导刊, 2022(19): 68-70.
- YANG B, LU Y Y. Evaluation of uncertainty in determination of moisture content in oil pepper by weightlessness drying method[J]. China Food Safety, 2022(19): 68-70.
- [56] 赵鹏瑶, 彭月梅, 吴建虎. 利用 VIS/NIR 反射光谱快速检测柿饼加工中水分含量[J]. 农产品加工, 2021(17): 49-52, 56.
- ZHAO P Y, PENG Y M, WU J H. Detection of water content

- during dried persimmon production by visible/near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Farm Products Processing*, 2021(17): 49-52, 56.
- [57] 刘振宇. 玉米水分含量测定中不确定度的分析与评定[J]. *现代畜牧科技*, 2019(10): 9-11.
- LIU Z Y. Analysis and evaluation of uncertainty in determination of maize moisture content [J]. *Technical Advisor for Animal Husbandry*, 2019(10): 9-11.
- [58] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 等. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- LUD, TANG J B, JIANG T L, et al. Research on rapid prediction model of rice moisture content based on near infrared spectroscopy [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- [59] 鞠兴荣, 后其军, 袁建, 等. 基于近红外光谱技术测定稻谷含水量研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(11): 120-124.
- JU X R, HOU Q J, YUAN J, et al. Determination of moisture content of rice based on the near infrared spectroscopy. *Journal of the Chinese Cereals & Oils Association*, 2015, 30(11): 120-124.
- [60] 伟利国, 张小超, 胡小安, 等. 微波在线式粮食水分检测系统[J]. *农机化研究*, 2009, 31(6): 145-147.
- WEI L G, ZHANG X C, HU X A, et al. Microwave on-line grain moisture detection system [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(6): 145-147.
- [61] 曹甜甜. 鹰嘴豆淀粉的提取及改性研究[D]. 新疆: 塔里木大学, 2022: 24-30.
- CAO T T. Study on extraction and modification of Chickpea starch [D]. Xinjiang: Tarim University, 2022: 24-30.
- [62] 金诚谦, 郭榛, 张静, 等. 大豆水分含量的高光谱无损检测及可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(10): 3 052-3 057.
- JIN C Q, GUO Z, ZHANG J, et al. Non-destructive detection and visualization of soybean moisture content using hyperspectral technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(10): 3 052-3 057.
- [63] 赵阳, 成晨, 杨璐璐, 等. 高光谱的草本植物水分含量检测模型构建[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 894-898.
- ZHAO Y, CHENG C, YANG L L, et al. Study of the establishment of herb water content detection model based on hyperspectral technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 894-898.
- [64] 张慧. 香菇热风干燥工艺优化及基于电子鼻检测其干燥阶段的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 28-46.
- ZHANG H. Optimization of hot air drying process of shiitakes and drying stage detection based on electronic nose [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020: 28-46.

(上接第 128 页)

- [15] AGGARWAL A, MITTAL M, BATTINENI G. Generative adversarial network: An overview of theory and applications[J]. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2021, 1(1): 100004.
- [16] 李钰, 杨道勇, 刘玲亚, 等. 利用生成对抗网络实现水下图像增强[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(2): 134-142.
- LI Y, YANG D Y, LIU L Y, et al. Underwater image enhancement based on generative adversarial networks[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2022, 56(2): 134-142.
- [17] NIU M Y, ZLOKAPA A, BROUGHTON M, et al. Entangling quantum generative adversarial networks [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(22): 220505.
- [18] SAXENA D, CAO J. Generative adversarial networks (GANs) challenges, solutions, and future directions[J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2021, 54(3): 1-42.
- [19] ALQHTANI H, KAVAKLI-THORNE M, KUMAR G. Applications of generative adversarial networks (gans): An updated review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28: 525-552.
- [20] RADFORD A, METZ L, CHINTALA S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks[J]. *arXiv preprint*, 2015: 1511.06434.

(上接第 146 页)

- [19] 李恒聪, 陈蔚, 于清泉, 等. 感觉/交感神经参与结肠炎模型大鼠敏化区域皮肤温度、血流灌注和皮肤组织炎性细胞因子变化[J]. *中国针灸*, 2022, 42(7): 785-793.
- LI H C, CHEN W, YU Q Q, et al. Changes in skin temperature, blood perfusion and inflammatory cytokines in skin tissue in rats with sensory/sympathetic involvement in colitis model rats [J]. *Chinese Journal of Acupuncture*, 2022, 42(7): 785-793.
- [20] 严皓哲, 汤璧嘉, 王勇兴. 复方猴头颗粒联合西药治疗老年胃溃疡临床疗效及对血清学指标的影响[J]. *新中医*, 2022, 54(7): 89-92.
- YAN H Z, TANG B J, WANG Y X. Clinical efficacy of compound monkey head granules combined with western medicine in the treatment of gastric ulcer in elderly elderly people and its effect on serological indexes[J]. *New Chinese Medicine*, 2022, 54(7): 89-92.
- [21] 任东根, 龚婷, 王丽娟, 等. 川麦冬多糖的结构特征及对过度运动引起小鼠肝损伤的改善作用[J/OL]. *食品与发酵工业*. (2022-11-27) [2023-04-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033543>.
- REN D G, GONG T, WANG L J, et al. Structural characteristics of polysaccharides and their effect on liver injury caused by excessive exercise[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*. (2022-11-27) [2023-04-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033543>.